

К ВОПРОСУ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСОВ ЦПТ

Л.А. Штанько, В.И. Чепурной, С.И. Ляш, З.С. Добровольская, С.И. Корняшек,
Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Украина

Показано, что для сохранения устойчивости крепления подземных сооружений комплексов ЦПТ скорость динамических колебаний породного массива от воздействия взрывных работ не должна превышать 3,0 см/с.

Актуальность работы. Практика производства горных работ показывает, что на устойчивость подземных сооружений комплексов ЦПТ, наряду со статическими нагрузками, связанными с действием горного давления, существенное влияние оказывают динамические, возникающие в результате производства взрывных работ.

При производстве взрывных работ на крепление подземных сооружений комплексов ЦПТ воздействуют динамические волны, которые условно подразделяются на сильные (нелинейные, ударные) волны, возникающие в массиве вблизи от центра взрыва и на слабые (динамические) волны, возникающие вдали от зарядов взрывчатых веществ. Динамические волны принадлежат к числу слабых акустических волн, теория распространения динамических волн в упругих средах развита достаточно полно. Физическая сущность явлений, происходящих в массиве горных пород при динамическом взрывном воздействии, сводится к появлению динамических нагрузок, приложенных к креплению, которые можно рассматривать как дополнительное горное давление, обусловленное инерционными силами и динамическим напряженным состоянием пород.

Изложение основного материала и результаты. Устойчивость крепления подземных сооружений комплексов ЦПТ оценивается соотношением.

$$R_{сж} > \sigma_{\max} + \sigma, \quad (1)$$

где $R_{сж}$ – несущая способность крепления, кгс/см²; σ – динамическая нагрузка на крепление, кгс/см².

При воздействии динамических взрывных нагрузок возникающие в массиве нормальные напряжения можно определить из выражения

$$\sigma = \frac{\gamma}{q} c_p v_o, \quad (2)$$

где c_p – скорость распространения продольных волн, см/с; v_o – скорость смещения (колебания) массива (массовая скорость) на контуре выработки, см/с; q – плотность горной породы, кгс/м³.

Скорость распространения продольных волн в свою очередь, определяется по формуле:

$$c_p = \sqrt{\frac{qE(1-\mu)}{v(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости при растяжении, кгс/см²; μ – коэффициент Пуассона.

Экспериментально для кристаллических пород на основании распространения сейсмических волн установлено, что $\mu=0,27$.

Скорость распространения продольных волн в различных породах приведена в табл. 1.

В свою очередь, скорость смещения породного массива в зависимости от расстояния до

взрыва R , его мощности и свойств массива по экспериментальным данным М.А. Садовского определяется по формуле:

$$v_o = c_o \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^2 \quad (4)$$

где Q – вес взрывчатого вещества, кгс; c_o - коэффициент, зависящий от свойств вещества ($c_o = 50 \div 450$), обычно принимают $c_o = 200$;

Таблица 1 Скорость распространения продольных волн в горных породах

Породы	Плотность породы, т/м ³	Скорость продольных волн, м/с
1	2	3
Монолитные песчаники	2,60	3600-4000
Трещиноватые песчаники	2,45-2,60	2900-3500
Алевриты	2,30-2,40	2500-3200
Аргиллиты	2,00-2,30	2000-2800
Амфиболиты	2,60-3,20	1500-2900
Граниты	2,40-2,70	1700-3100
Диабазы	2,88-2,94	1600-3200
Кварциты	3,10-3,41	3400-4300

$$R_{сж} > \sigma_{сж} + \sigma = \sigma_{макс} + \frac{v}{q} c_p v_o \cdot \quad (5)$$

Отсюда предельно допустимая скорость смещения массива не должна превышать

$$v_o < \frac{(R_{сж} - \sigma_{макс})}{\gamma c_p} g \cdot \quad (6)$$

Механизм деформации подземных сооружений в результате воздействия динамических взрывных волн может быть представлен следующим образом. При определенном сочетании технических факторов разрушение массива проявляется в виде его растрескивания. Параметры трещин зависят от величины, продолжительности и формы волны сжатия, параметров и формы подземного сооружения, физико-механических свойств горных пород.

В настоящее время установлено, что закон приложения нагрузки $q_{дин}$ к преграде в зависимости от времени t имеет вид

$$q_{дин}(t) = \frac{q_o}{t^3} \quad (7)$$

где q_o - постоянная.

До сих пор предполагалось, что преграда, находящаяся на контуре воздействия фронта динамической взрывной волны, расположена перпендикулярно к направлению фронта распространения ударной волны. Если же преграда расположена под некоторым углом α к этому направлению, то действующий на данную преграду импульс уменьшится на некоторую величину. В этом случае величина импульса, который воспримет преграда, имеющая площадь S и массу m , при отражении динамической взрывной волны

$$mv_o = 2i_o S (\cos^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha) \quad (8)$$

где λ – динамический коэффициент бокового распора, численно равный 0,3-0,5, v_o – мгновенная скорость колебаний преграды в момент отражения динамической взрывной волны.

Отсюда

$$v_o = \frac{2i_o S}{m} (\cos^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha) \quad (9)$$

С учетом многократного воздействия динамических взрывных нагрузок на горный массив в окрестности подземного сооружения величина отжима пород в боку выработки определяется по формуле 10

$$c_{дин} = \left[\frac{\kappa_{сж} (\gamma H = \frac{\gamma \cdot c_p v_o}{q})}{\kappa_b \sigma_{сж}} - 1 \right] h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90^\circ - \rho}{2} \right) = \left(\frac{\kappa_{сж} \gamma H}{\kappa_b \sigma_{сж}} - 1 \right) h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \rho}{2} \right) + \frac{\gamma c_p v_o \kappa_{сж}}{q \kappa_b \sigma_{сж}} h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \rho}{2} \right) =$$

$$= c + \Delta c_{дин}$$

где h – высота сооружения; H – глубина залегания сооружения от поверхности; c_p – скорость распространения динамической взрывной волны; ρ – угол внутреннего сопротивления породы; $\kappa_{сж}$ – коэффициент концентрации сжимающих напряжений; c – величина отжима породы; $\Delta c_{дин}$ – увеличение отжима пород за счет динамической составляющей; κ_b – коэффициент литотипности пород боков выработки.

Величина вывала пород из кровли

$$B_{Д} = \frac{a + c + \Delta c_{дин}}{\kappa_k f_k} = B + \Delta B_{дин} \quad (11)$$

где a – полупролет сооружений; B – высота свода обрушения; $\Delta B_{дин}$ – увеличение свода обрушения за счет динамической составляющей; f_k – коэффициент крепости пород кровли; κ_k – коэффициент литотипности пород кровли сооружения.

Формулы и получены в предположении, что при многократном воздействии ударной волны на горный массив к основному статистическому напряжению добавляется динамическая составляющая

$$\sigma = \frac{\gamma q}{c_p v_o} = \frac{\gamma c_p}{2} v_o \quad (12)$$

Таким образом, в соответствии с теорией сводообразования величина отжима пород в боку выработки и величина вывала пород непосредственной кровли увеличиваются на динамическую составляющую

$$\Delta c_{дин} = \frac{\gamma c_p \cdot v_o}{q \cdot k} h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90^\circ - \rho}{2} \right) \quad (13)$$

$$\Delta B_{дин} = \frac{\Delta c_{дин}}{\kappa_k f_k} \quad (14)$$

Результаты расчета наибольшей скорости колебаний массива от динамического взрывного воздействия, при котором не нарушается устойчивость крепления, приводятся в таблице 2.

Таблица 2 Результаты расчета наибольшей скорости динамических взрывных колебаний, при которых не нарушается устойчивость крепи, например для наклонных стволов ЦПТ ДФ-3 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Наклонный ствол	Напряжения от горного давления σ_{\max} , МПа	Наибольшая динамическая скорость взрывных колебаний, v_0 , см/с
1	2	3
ЛК-1	6,82	3,91
ЛК-2	10,23	3,58
ЛК-3	5,58	4,02

Согласно ГОСТ 6249-52 рассчитанные наибольшие скорости динамических взрывных колебаний соответствуют 6 баллам (табл. 3). Таким образом, для сохранения устойчивости крепи скорость динамических взрывных колебаний для сети подземных сооружений комплексов ЦПТ не должна превышать 3,0 см/с.

Таблица 3 Динамическая взрывная шкала по ГОСТ 6249-52

Баллы	Наибольшие скорости колебаний горного массива, см/с
1	0,2
2	0,2-0,4
3	0,4-0,8
4	0,8-1,5
5	1,5-3,0
6	3,0-6,0
7	6,0-12,0
8	12,0-24,0
9	24,0-48,0
10-12	>48,0

Выводы

1. На устойчивость подземных сооружений комплексов ЦПТ наряду со статическими, связанными с действием горного давления, существенное влияние оказывают динамические нагрузки, возникающие в результате производства взрывных работ.

2. Физическая сущность явлений, происходящих в массиве горных пород при динамическом взрывном воздействии сводится к появлению динамических нагрузок, приложенных к креплению, которые можно рассматривать как дополнительное горное давление, обусловленное инерционными силами и динамическим напряженным состоянием пород.

3. Для сохранения устойчивости крепления подземных сооружений комплексов ЦПТ скорость динамических колебаний породного массива от воздействия взрывных работ не должна превышать 3,0 см/с.

Список литературы

1. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. -М.: Наука, 1975.-872 с.
2. Дж. Бендат, А. Пирсол. Применение корреляционного и спектрального анализа. - М.:Мир, 1983.-310 с.